УДК 621.039.52.034

ДЕФИЦИТ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ В МАНЕВРЕННОМ РЕЖИМЕ РЕАКТОРА ВВЭР С ПЛУТОНИЕВОЙ ЗАГРУЗКОЙ

В.И. Бойко, И.В. Шаманин, С.В. Кригер, Т.Л. Сафарян

Томский политехнический университет
E-mail: shamanin@phtd.tpu.ru

Рассмотрены особенности протекания нейтронно-физических процессов в маневренном режиме реактора ВВЭР, вызванные дефицитом запаздывающих нейтронов при замещении стандартного топлива торий-плутониевым. Сформулированы рекомендации для модификации регламентов управления мощностью реактора и обоснованы преимущества смешанной загрузки активной зоны.

Введение

Высокоэффективным путем утилизации плутония оружейной кондиции является его использование в торий-плутониевых оксидных топливных композициях [1, 2]. В данных работах анализируются основные параметры кампании легководного реактора ВВЭР при использовании в составе топлива композиций ThO_2 и PuO_2. Рассмотрен вариант организации замкнутого цикла, требующий значительных конструктивных изменений [1], и вариант организации окрытого цикла на базе серийной конструкции тепловыделяющих сборок [2]. При замещении стандартного оксидного топлива торий-плутониевым возникает проблема, обусловленная дефицитом запаздывающих нейтронов. В стационарном режиме они не играют существенной роли. Проблема становится очевидной при рассмотрении переходных процессов. Полная загрузка активной зоны торий-плутониевым оксидным топливом влечет за собой уменьшение эффективной доли запаздывающих нейтронов практически в 3 раза. Штатные регламенты изменения реактивности реактора, пригодные для стандартного топлива, требуют существенных изменений. Их характер определяется составом загрузки активной зоны. Таким образом, после оптимизации состава и схемы загрузки по определяющим параметрам топливоиспользования, следует вторая оптимизационная задача – по нейтронно-физическим параметрам в маневренном режиме.

Данная работа посвящена сравнительному анализу быстропротекающих процессов, вызванных идентичными изменениями реактивности или мощности реактора ВВЭР, в случаях загрузки стандартным и торий-плутоний-содержащим оксидным топливом.

Методика анализа, регламенты изменения реактивности и мощности

При определении преимуществ (недостатков) той или иной схемы загрузки проводится анализ функций, описывающих поведение во времени нейтронной мощности, которые являются откликом на какой-либо фиксированный закон изменения реактивности. Нестационарный процесс дробится во времени. Связь между реактивностью и нейтронной мощностью задается соотношениями:

$$\frac{n_k - n_{k-1}}{n_k} U_1 + \frac{n_{k-1} - n_{k-2}}{n_k} U_2 + ... + \frac{n_1 - n_0}{n_k} U_k = \bar{\rho}_k,$$

$$n_k = \frac{n_{k-1} U_1 - (n_{k-1} - n_{k-2}) U_2 - ... - (n_1 - n_0) U_k}{U_1 - \bar{\rho}_k}.$$

где n_k – значение нейтронной мощности на k-ом временном шаге; n_0 – стартовый уровень нейтронной мощности; $\bar{\rho}_k$ – значение реактивности в единицах $\beta_{эфф}$; $\beta_{эфф}=\sum_{i=1}^{N}\beta_{эфф.i}$ – сумма эффективных долей запаздывающих нейтронов i-ых групп; N – количество групп запаздывающих нейтронов; U_k в соответствии с [3] – функция линейного отклика.

Функция U_k определяет такое изменение реактивности, которое вызывает линейное изменение нейтронной мощности в течение интервала времени $\Delta\tau$ и дальнейшее ее поддержание на постоянном уровне. Значение U_k определяется соотношениями:

$$U = \sum_{i=1}^{N} \frac{a_i (1 - \exp(-\lambda_i \tau))}{\lambda_i \Delta\tau}, \quad 0 \le \tau \le \Delta\tau,$$

$$U_k = \sum_{i=1}^{N} \frac{a_i (1 - \exp(-\lambda_i \Delta\tau))}{\lambda_i \Delta\tau} \cdot \exp(-\lambda_i (\tau_k - \Delta\tau)), \quad \tau > \Delta\tau,$$

где $\tau_k = k\Delta\tau$, $a_i = \beta_i / \beta$, $\sum_{i=1}^{N} a_i = 1$, λ_i – постоянная распада ядер – источников запаздывающих нейтронов i-ой группы. Доли запаздывающих нейтронов определяются соотношением:

$$\beta_i = \sum_j \beta_i^j \frac{N_j \sigma_f^j \nu_f^j}{\sum_j N_j \sigma_f^j \nu_f^j},$$

где N_j – ядерная концентрация j-ого делящегося нуклида, σ_f^j – микроскопическое сечение деления, ν_f^j – число вторичных нейтронов после одного акта деления j-ого нуклида. Количество групп запаздывающих нейтронов в расчетах варьируется: стандартное значение – 6 [4] и 20 групп, что необходимо для обеспечения приемлемой точности расчета в случаях малой эффективной доли запаздывающих нейтронов.

Регламенты изменения реактивности определялись по заданным регламентам изменения мощности для случая загрузки активной зоны стандартным оксидным топливом, которые приведены на рис. 1–6.

Регламенты 1 и 2 соответствуют случаям неконтролируемого увеличения реактивности (гипотетические инциденты). Данные быстропротекающие изменения нейтронной мощности вызывают соответствующие изменения температуры резонансных поглотителей, но не успевают вызывать адекватное изменение температуры и плотности воды. Запаздывание изменений температуры воды от изменений температуры топливной композиции составляет 8...12 с. Регламенты 3–6 являются штатными. Например, регламент 3 реализуется при изменении электрической нагрузки, когда АРМ изменяет мощность реактора в соответствии с изменением давления во 2-ом контуре, регламент 5 реализуется при превышении уровня потока нейтронов до 112 % номинального в случае подключения неработающей петли.

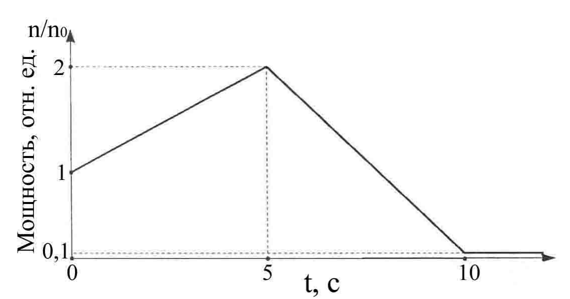


Рис. 1. Регламент 1: неконтролируемое увеличение мощности, соответствующее гипотетической реактивностной аварии

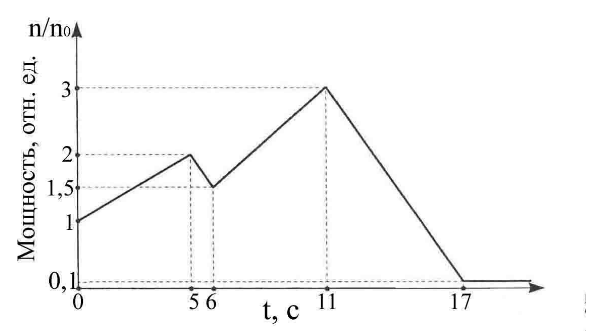


Рис. 2. Регламент 2: два последовательных увеличения мощности и ее резкое уменьшение под действием СУЗ (системы управления и защиты)

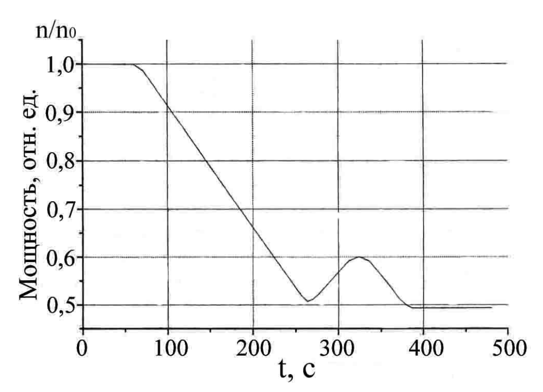


Рис. 3. Регламент 3: работа АРМ (автоматического регулятора мощности) при резком изменении электрической нагрузки на 50 % в режиме регулирования частоты в энергосистеме

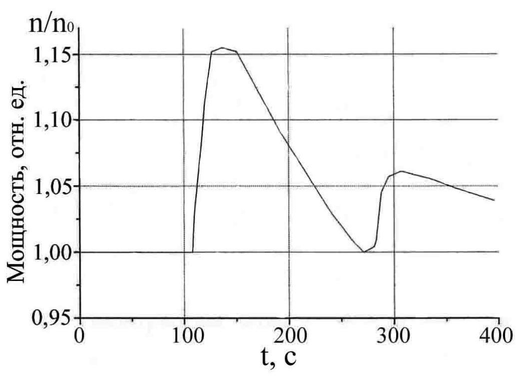


Рис. 4. Регламент 4: отработка СУЗ блока изменений по частоте

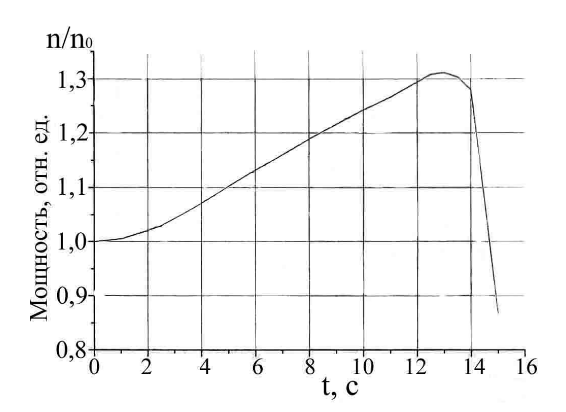


Рис. 5. *Регламент 5: подключение неработающей петли с поступлением холодной воды при пониженной концентрации борной кислоты*

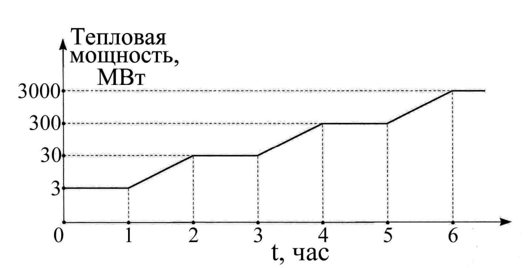


Рис. 6. *Регламент 6: нормальный пуск с пошаговым увеличением мощности*

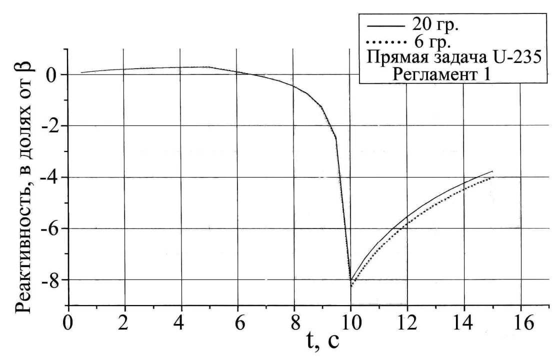


Рис. 9. *Изменение реактивности во времени*

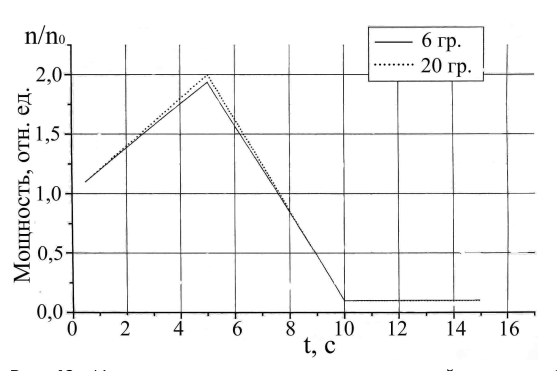


Рис. 10. *Изменение мощности для стандартной загрузки. Состав: ^{233}U-0; ^{235}U-1; ^{239}Pu-0; ^{241}Pu-0*

Решение прямой и обратной задачи

Прямая задача состоит в определении закона изменения реактивности $\rho(t)$, который обеспечивает заданный закон изменения мощности $n(t)$. Решение проводится с учетом 6 и 20 групп запаздывающих нейтронов. Обратная задача состоит в определении изменений во времени мощности $n(t)$, которые вызваны заданным законом изменения реактивности. Соответствующие схемы приведены ниже.

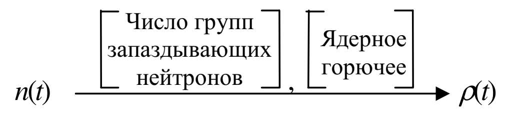


Рис. 7. *Прямая задача*

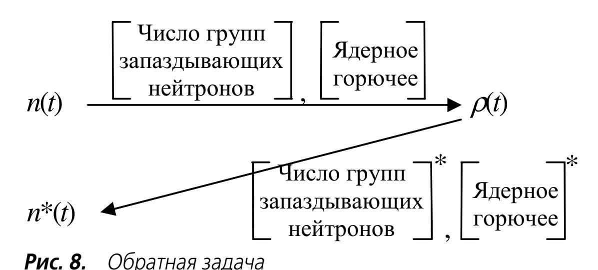
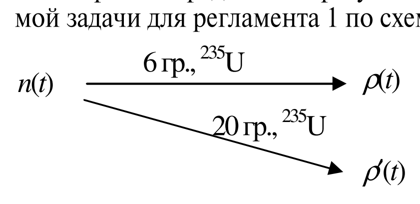
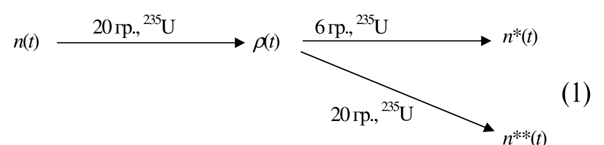


Рис. 8. *Обратная задача*

На рис. 9 представлен результат решения прямой задачи для регламента 1 по схеме:



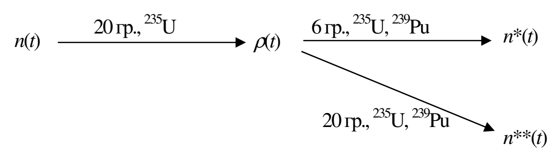
Результаты расчета в 6-ти и 20-ти групповом приближениях по запаздывающим нейтронам отличаются в среднем на 7...9 %. При этом всплеску нейтронной мощности от 1 до 2 отн. ед. в 20-ти групповом приближении соответствует меньшее значение отрицательной реактивности, чем в 6-ти групповом. Усредненное значение периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов в 6-ти групповом приближении больше, чем в 20-ти групповом: $\overline{T}_{1/2}^{6групп} \approx 1{,}711$ с, $\overline{T}_{1/2}^{20групп} \approx 1{,}460$ с. По этой причине при решении обратной задачи по схеме



(1)

всплеск мощности $n^{**}(t)$ больше всплеска $n^{*}(t)$, определенного в 6-ти групповом приближении (рис. 10).

Для смешанной безториевой загрузки результат решения задачи по схеме



сильно зависит от соотношения концентраций ^{235}U и ^{239}Pu. Так, в случае, когда 60 % делящихся ядер представлены ^{235}U, а 40 % – ^{239}Pu, β=0,00424. Всплеск мощности $n^{**}(t)$ в 20-ти групповом приближении (рис. 11, *а*) больше, чем всплеск в 6-ти групповом приближении $n^{*}(t)$.

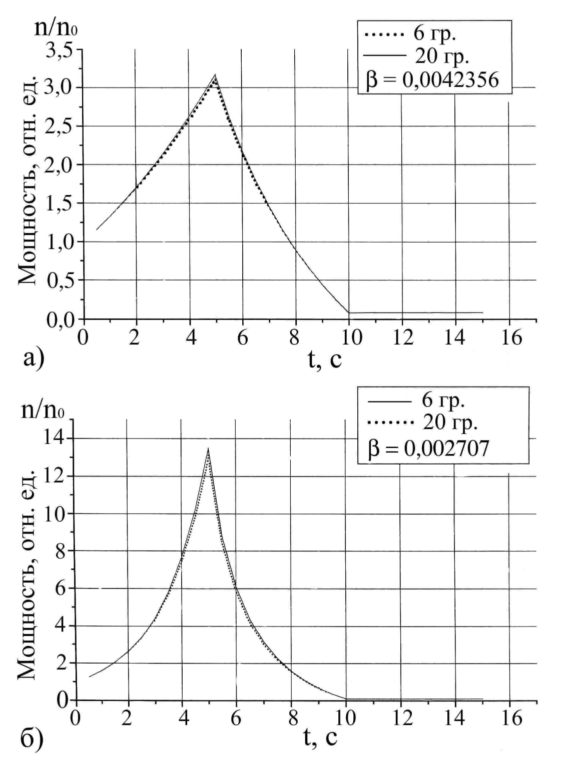


Рис. 11. *Изменение мощности для смешанной безториевой загрузки: а) Состав: ^{233}U-0; ^{235}U-0,6; ^{239}Pu-0,4; ^{241}Pu-0; б) Состав: ^{233}U-0; ^{235}U-0,2; ^{239}Pu-0,8; ^{241}Pu-0*

Для β=0,00270 (80 % – ^{239}Pu, 20 % – ^{235}U) ситуация обратная (рис. 11, *б*). Это вызвано существенным отличием 6-ти и 20-ти групповых систем констант запаздывающих нейтронов для ^{235}U и ^{239}Pu (табл. 1).

Таблица 1. *Усредненные периоды полураспада $\overline{T}_{1/2}$ ядер-предшественников запаздывающих нейтронов, с*

Число групп	Делящийся нуклид	
	^{235}U	^{239}Pu
6	1,711	1,946
20	1,460	2,090

Амплитуды нейтронной мощности превышают таковую для стандартного состава загрузки в 1,6 раз.

На рис. 12 представлены результаты решения задач для регламента 3 по схемам

$n(t)$ —(20 гр., ^{235}U)→ $\rho(t)$ —(6 гр., ^{239}Pu)→ $n^*(t)$; $\rho(t)$ —(20 гр., ^{239}Pu)→ $n^{**}(t)$ (2)

$n(t)$ —(20 гр., ^{235}U)→ $\rho(t)$ —(6 гр., ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu)→ $n^*(t)$; $\rho(t)$ —(20 гр., ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu)→ $n^{**}(t)$ (3)

Нуклидный состав топлива соответствует торий-содержащей загрузке, включающей композиции (Th,Pu)O_2.

Для чистого ^{239}Pu эффективная доля запаздывающих нейтронов примерно в 3 раза меньше, чем для ^{235}U. Это вызывает значительное увеличение темпа изменения мощности при идентичном введении положительной или отрицательной реактивности. В данном случае скорость уменьшения мощности $n^{**}(t)$ и $n^*(t)$ для торий-плутониевой загрузки примерно в 1,5 раза больше, чем для стандартной загрузки. Отличие результатов расчета в 6-ти и 20-ти групповом приближениях по запаздывающим нейтронам составило 1,5 %. При образовании к окончанию цикла выгорания нуклидов ^{233}U, ^{235}U и ^{241}Pu отклик нейтронной мощности (рис. 12, *б*) мало отличается от такового на начало цикла (рис. 12, *а*). Следует также отметить, что при введении положительной реактивности происходит кратковременное уменьшение эффективной доли запаздывающих нейтронов, а при введении отрицательной – увеличение. Это приводит к тому, что при равных по абсолютному значению скачках реактивности, установившийся период реактора в подкритическом состояний больше, чем в надкритическом. В результате, в аварийных регламентах 1 и 2 при ρ>0 с ростом ρ установившийся период уменьшается вплоть до значения, определяемого мгновенными нейтронами, а при ρ<0 он не может быть меньше, чем время жизни наиболее долгоживущих ядер-предшественников запаздывающих нейтронов.

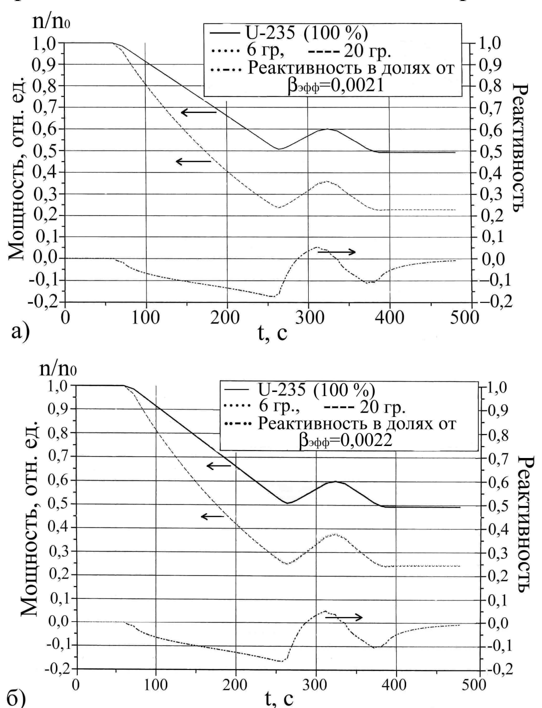


Рис. 12. *Изменение мощности и реактивности для торий-плутониевой загрузки: а) начало цикла выгорания, состав: ^{233}U-0; ^{235}U-0; ^{239}Pu-1; ^{241}Pu-0; б) конец цикла выгорания, состав: ^{233}U-0,3432; ^{235}U-0,0058; ^{239}Pu-0,5358; ^{241}Pu-0,1233*

На рис. 13 представлены результаты расчета для регламента 4 по схемам (2) и (3), соответственно. Нейтронная мощность в случае торий-плутониевой загрузки (рис. 13, *а*) растет в 3 раза быстрее,

чем в случае стандартной загрузки. При этом решения обратной задачи в 6-ти и 20-ти групповых приближениях отличаются не более чем на 3 %. Решение, соответствующее составу топлива в конце цикла выгорания (рис. 13, *б*), мало отличается от выше рассмотренного (рис. 13, *а*).

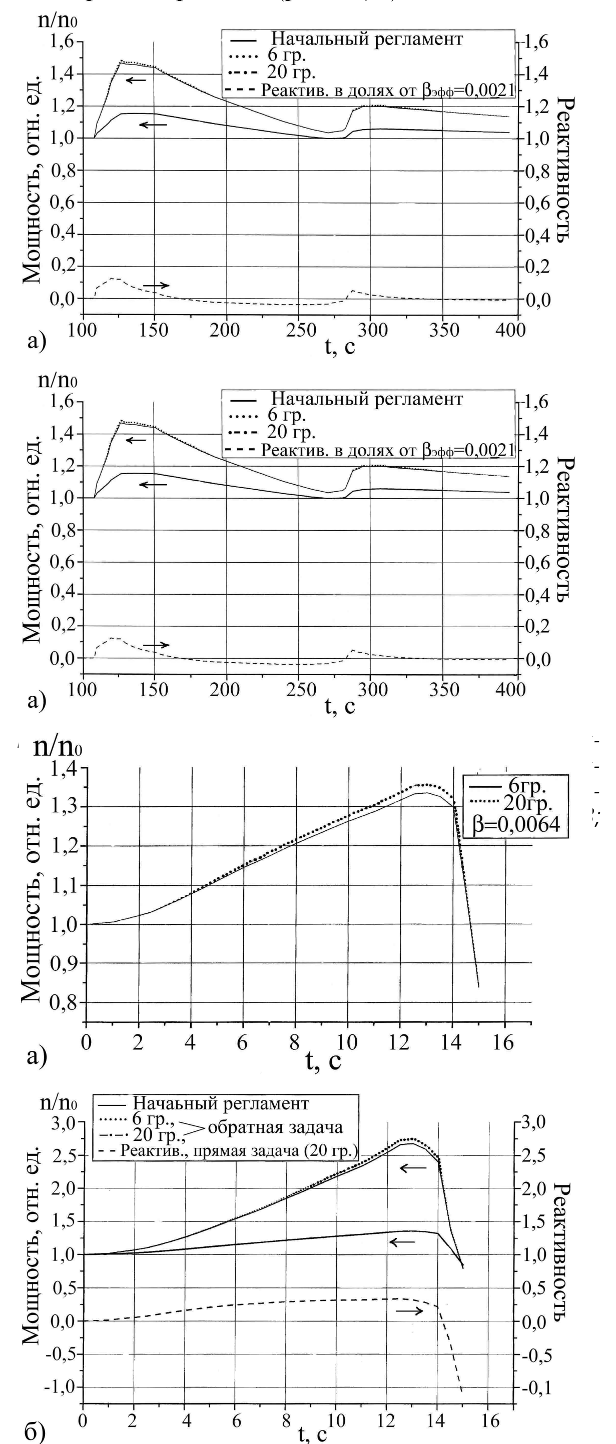


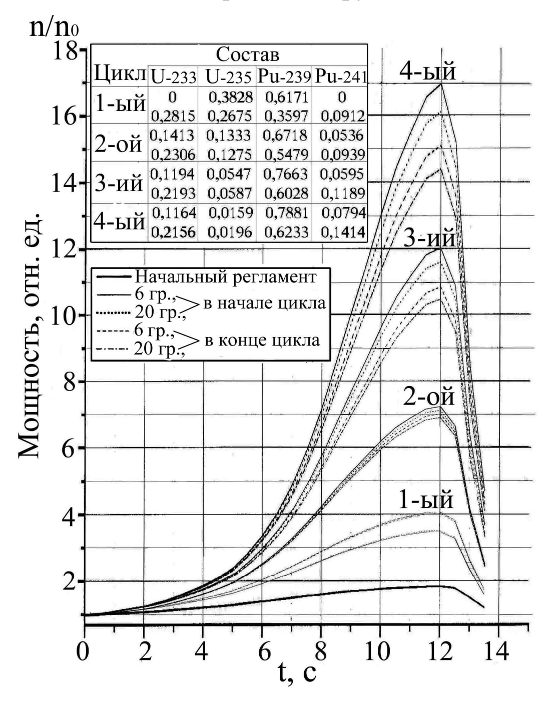
Рис. 14. *Изменение мощности и реактивности для регламента 5: а) стандартная загрузка; б) торий-плутониевая загрузка, состав: ^{233}U-0; ^{235}U-0; ^{239}Pu-1; ^{241}Pu-0*

На рис. 14, *а* представлен результат расчета для регламента 5 по схеме (1), т.е. решения прямой и обратной задачи для стандартной загрузки в 6-ти и 20-ти групповых приближениях. Отклик мощности $n^*(t)$ на возмущение реактивности $\rho(t)$ в стандартном 6-ти групповом приближении по запаздывающим нейтронам, меньше, чем отклик $n^{**}(t)$ в 20-ти групповом приближении на 7 %. На рис. 14, *б* приведены результаты расчета данного регламента по схеме (2). В этом случае (торий-плутониевая загрузка) мощность реактора превышает таковую для стандартной загрузки почти в 5 раз. Отличие решений в 6-ти и 20-ти групповых приближениях составляет 5,5 %.

Смешанная ториевая загрузка: $(Th,Pu)O_2+(Th,^{235}U)O_2$

Смешанная ториевая загрузка образует длинную кампанию, включающую 4 цикла выгорания и 3 частичные перегрузки. Расчет проводится по схеме (3) для состава топлива в начале и в конце каждого цикла выгорания в случае подключения неработающей петли с поступлением холодной воды (регламент 5).

На рис. 15 и 16 приведены результаты расчетов для смешанной ториевой загрузки.



Цикл	Состав U-233	U-235	Pu-239	Pu-241
1-ый	0 0,2815	0,3828 0,2675	0,6171 0,3597	0 0,0912
2-ой	0,1413 0,2306	0,1333 0,1275	0,6718 0,5479	0,0536 0,0939
3-ий	0,1194 0,2193	0,0547 0,0587	0,7663 0,6028	0,0595 0,1189
4-ый	0,1164 0,2156	0,0159 0,0196	0,7881 0,6233	0,0794 0,1414

Рис. 15. *Изменение мощности в различных циклах выгорания*

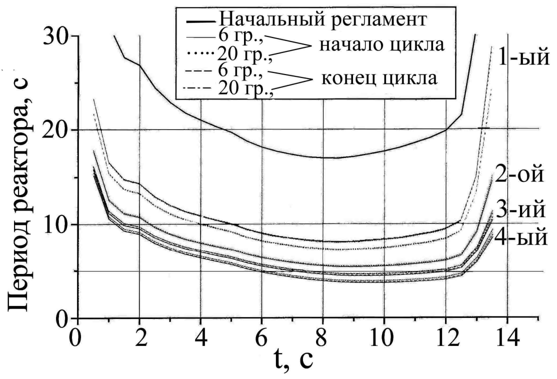


Рис. 16. *Изменение периода в различных циклах выгорания*

Увеличение доли ^{239}Pu в топливной загрузке приводит к уменьшению доли запаздывающих нейтронов и, следовательно, к ускорению динамики роста мощности и уменьшению периода. Согласно регламенту 4 период реактора при стандартной загрузке составляет не менее 17 с. Для смешанной ториевой загрузки период при наиболее благоприятных условиях (наименьшее содержание ^{239}Pu, рис. 16) составляет 5 с (в начале первого цикла выгорания) и 7 с в конце цикла. В остальных случаях период меньше 5 с. Поскольку для стандартного топлива уставка срабатывания СУЗ составляет 10 с, данный регламент может оказаться причиной аварийного срабатывания без выдержки во времени.

Различие амплитуд мощности, определенных в 6-ти и 20-ти групповом приближениях, составляет 1,5...7 % в зависимости от нуклидного состава топлива.

Регламент 6 (рис. 6) соответствует случаю медленного пошагового увеличения мощности. В расчетах принималось, что температура резонансных поглотителей и воды изменяются, как показано на рис. 17. Изменения полного запаса реактивности $\Delta k_{эфф}$ в течение подъема мощности приведены на рис. 18. Они обусловлены изменениями температуры резонансных поглотителей и воды.

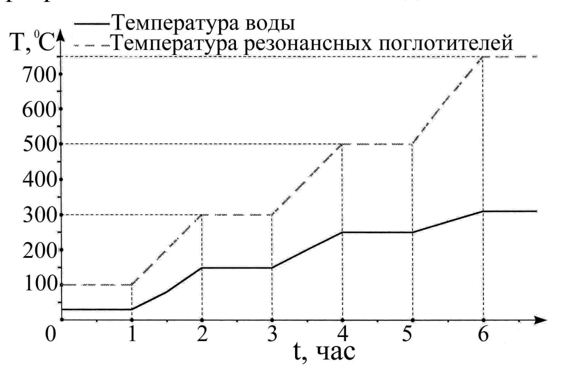


Рис. 17. *Изменения температуры воды и резонансных поглотителей*

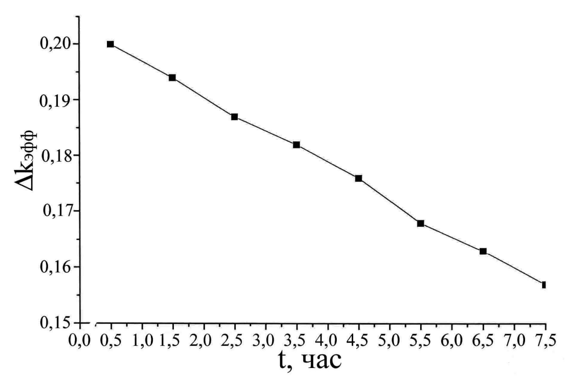


Рис. 18. *Уменьшение полного запаса реактивности*

Регламенты изменения реактивности, соответствующие ранее приведенным регламентам изменения нейтронной мощности для стандартного оксидного топлива (загрузка U), приведены на рис. 19 и 20.

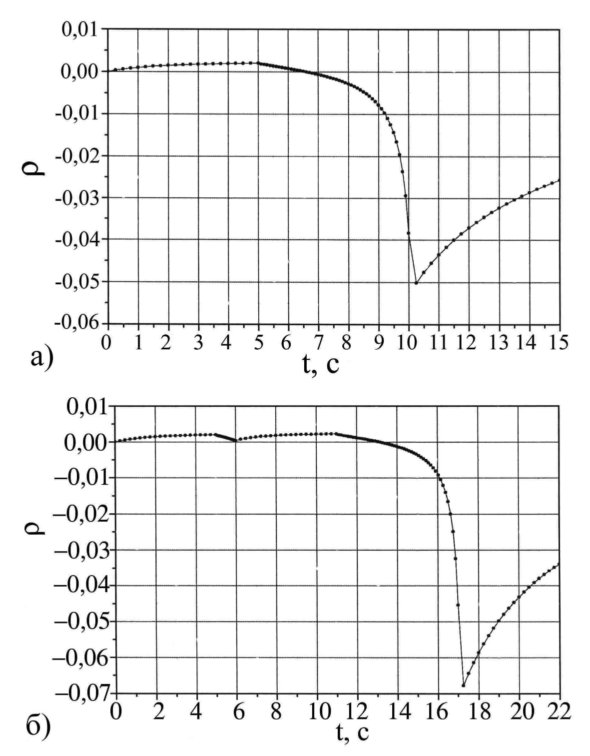


Рис. 19. *Изменение реактивности для n(t) по регламенту: а) 1; б) 2*

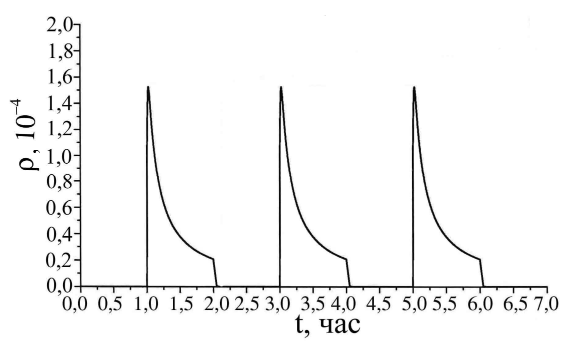


Рис. 20. *Изменение реактивности для n(t) по регламенту 6*

Приведенные регламенты определялись без учета отрицательной обратной связи, обусловленной Допплер-эффектом. Затем они использовались для расчетов соответствующих изменений нейтронной мощности в случаях смешанной торий-уран-плутониевой (схема TUP) и торий-плутониевой (схема TP) загрузок. Динамика изменений мощности, обусловленных изменениями реактивности (рис. 19 и 20), представлена на рис. 21 и 22.

Результаты расчетов показывают, что амплитудные значения мощности, развиваемой при тех же регламентах изменения реактивности, в случае смешанной загрузки (схема TUP) в 2 и более раза превышают таковые в случае стандартной загрузки (схема U). Для изменений реактивности, приведенных на рис. 19 значения освобожденной реактивности, приемлемые для стандартной загрузки, также допустимы для смешанной ториевой загрузки, поскольку возможности СУЗ обеспечивают адекватный отклик компенсаторов реактивности на

увеличение мощности. Более того, с учетом отрицательной обратной связи за счет Допплер-эффекта, приведенные скорости увеличения реактивности можно считать ядерно-безопасными. В случае схемы TP (торий-плутониевая загрузка без ^{235}U) возможности стандартной СУЗ недостаточны для подавления резкого увеличения нейтронной мощности. С учетом Допплер-эффекта и большой скорости роста температуры резонансных поглотителей данную ситуацию можно считать самоустраняющейся.

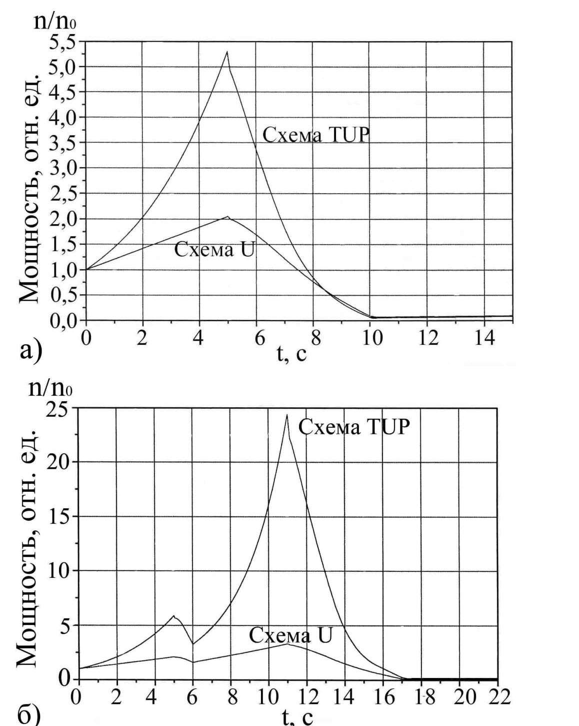


Рис. 21. *Изменение мощности для $\rho(t)$: а) по регламенту 1 (см. рис. 19, а); б) по регламенту 2 (см. рис. 19, б)*

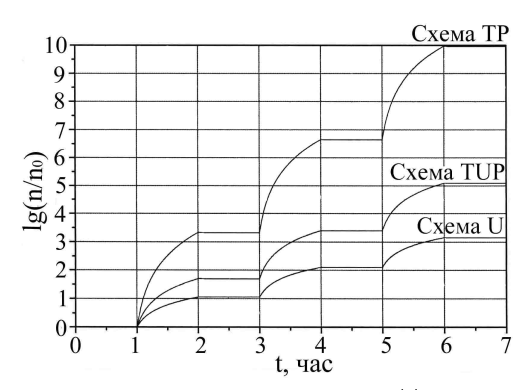
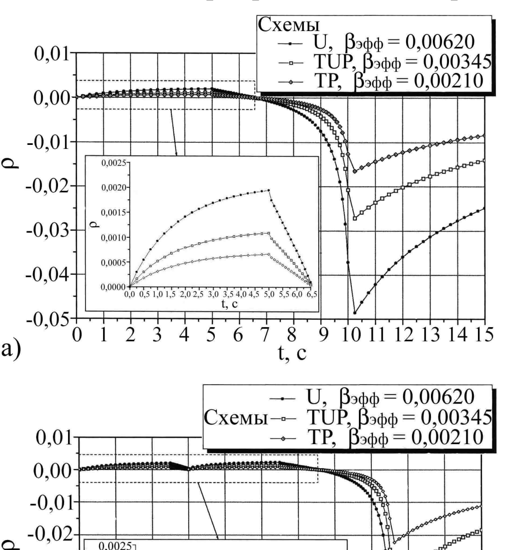


Рис. 22. *Изменение мощности для $\rho(t)$ по регламенту 6 (см. рис. 20)*

Регламент изменения реактивности, приведенный на рис. 20, приемлем для всех рассматриваемых схем загрузки топлива. Но в случае смешанной ториевой загрузки (схема TUP) требуемый уровень мощности достигается за 2 шага освобождения реактивности, а в случае торий-плутониевой загрузки (схема TP) – за 1 шаг. В результате, скорость роста температуры активной зоны в случаях TUP и TP превышает допустимые значения. Таким образом, регламенты освобождения реактивности для нормального пошагового увеличения мощности должны быть изменены.

На рис. 23 и 24 приведены регламенты изменения реактивности, которые обеспечивают идентичные регламенты изменения нейтронной мощности для различных схем и составов топливных загрузок.

По сравнению со стандартной загрузкой смешанная ториевая и безурановая торий-плутониевая загрузки обеспечивают значительно большую чувствительность к изменениям реактивности. Пропорция между амплитудами освобождаемой реактивности, которая вызывает идентичное изменение мощности, равна пропорции между значениями $\beta_{эфф}$. В случае неконтролируемого увеличения реактивности это является негативным фактором, но в случае необходимости резкого сброса мощности этот фактор играет положительную роль – эффективность СУЗ при той же скорости погружения компенсаторов реактивности возрастает.



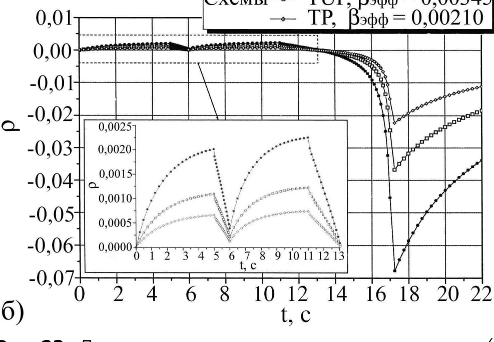


Рис. 23. *Допустимые изменения реактивности для $n(t)$ по регламенту: а) 1; б) 2*

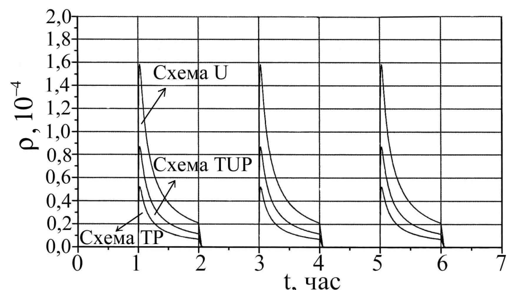


Рис. 24. *Допустимые изменения реактивности для $n(t)$ по регламенту 6*

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сформулировать следующие выводы:

– в случаях смешанной ториевой загрузки и безурановой торий-плутониевой загрузки реактор становится более чувствительным к резким изменениям реактивности, чем при загрузке стандартным UO_2 топливом;
– смешанная ториевая загрузка позволяет при маневрировании мощностью реактора избежать сложностей, обусловленных дефицитом запаздывающих нейтронов;
– кратковременные неконтролируемые увеличения реактивности, допустимые при загрузке активной зоны стандартным UO_2 топливом, также допустимы при смешанной ториевой загрузке: $(Th,Pu)O_2+(Th,^{235}U)O_2$. В случае безурановой торий-плутониевой загрузки эти же скачки реактивности могут быть подавлены за счет сильного Допплер-эффекта на тории;
– для пошагового увеличения мощности реактора величины высвобождаемых реактивностей должны быть уменьшены пропорционально уменьшению величины $\beta_{эфф}$;
– при модификации регламентов управления реактором следует принимать во внимание, что результаты решения прямой и обратной задач теории управления ($n(t)\Rightarrow\rho(\mathrm{t})$ и $\rho(\mathrm{t})\Rightarrow n(t)$) зависят от количества групп запаздывающих нейтронов, принимаемых во внимание. В рассмотренных случаях они отличаются на 1,5...12 % в зависимости от состава топлива;
– с точки зрения ядерной безопасности при стандартных конструкциях активной зоны, тепловыделяющих сборок и системы управления и защиты предпочтительной является смешанная ториевая загрузка: $(Th,Pu)O_2+(Th,^{235}U)O_2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев-Степной Н.Н., Лунин Г.Л., Морозов А.Г. и др. Легководный ториевый реактор // Атомная энергия. — 1998. — Т. 85. — № 4. — С. 263–277.
2. Шаманин И.В., Ухов А.А., Рюттен Г.И., Хаас К., Шерер В. Результаты моделирования параметров топливного цикла для водо-водяного энергетического реактора // Известия вузов. Сер. Ядерная энергетика. — 2000. — № 4. — С. 53–64.
3. Кузнецов И.А. Аварийные и переходные процессы в быстрых реакторах. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 176 с.
4. Овчинников Ф.Я., Голубев Л.И., Добрынин В.Д. и др. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических ядерных реакторов. — М.: Атомиздат, 1979. — 288 с.

УДК 621.039.542.34